

文章编号:1001-9081(2005)10-2247-03

## 基于遗传算法实现并行路径的自适应流量工程

曾志民, 张 晨, 冯春燕, 丁 炜

(北京邮电大学 通信网络综合技术研究所, 北京 100876)

(zengzm@bupt.edu.cn)

**摘 要:**研究实现动态并行路径的集中式流量工程,利用遗传算法提出流量优化算法,基于网络拥塞信息动态精简优化对象,基于网络链路利用率动态确定并行路径的采用,同时给出在并行路径间可行、简洁的流量分配方案简化算法的进化选择。仿真结果验证了提出的算法简化了解空间、降低了复杂度、提高了收敛速度,可同时确保优化性能。

**关键词:**流量工程;遗传算法;并行路径;流量分配

**中图分类号:** TP393 **文献标识码:** A

## Adaptive traffic engineering of parallel paths based on genetic algorithm

ZENG Zhi-min, ZHANG Chen, FENG Chun-yan, DING Wei

(Institute of Telecommunication Network Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications,  
Beijing 100876, China)

**Abstract:** The centralized traffic optimization based on dynamic parallel paths was discussed with genetic algorithm. The ATEPP (Adaptive Traffic Engineering of Parallel Paths) algorithm was proposed. The network congestion information and the link utilization were integrated into the proposed algorithm so that it can dynamically decide the optimized objectives and decide whether a pair of source and destination nodes used parallel paths. The evolution selection of genetic algorithm was simplified by the offered feasible and simple traffic assignment solutions. The simulation analysis shows that the proposed algorithm can reduce the solution space, decrease the complexity, increase the convergence speed and assure the optimization performance well.

**Key words:** traffic engineering; genetic algorithms; parallel paths; traffic assignment

## 0 引言

集中式流量工程<sup>[1]</sup>通常由一台核心服务器周期性地收集各路路由器的网络状态信息,得出路由方案并反馈给各个路由器,一般采用 off-line 方式处理大量的状态信息以获得更好的全局优化效果。与分布式流量工程相比,集中式流量工程更为关注整个网络的服务质量、成本甚至利润等。

基于隐式路由<sup>[2,3]</sup> (Implicit Routing) 的集中式流量工程研究,基本思想是利用全局或局部信息重置链路权值来优化网络流量,但是隐式路由自身的缺陷难以通过采用各种现代优化算法得以完全克服,如难以实现多 QoS 目标、解空间大、搜索与计算复杂度高、附加网络开销大、流量反复波动和事实上的局部优化等。基于显示路由<sup>[4]</sup> (Explicit Routing) 的集中式流量工程研究,基本思想是根据每对出入节点流量的 QoS 需求从相应的可行路径集中选择一条或多条并行路径来优化流量,优化策略灵活,可以在网络边缘实现优化方案,目前的研究主要采用单路径,缺乏并行路径间流量优化的算法研究,且不考虑网络拥塞信息。

本文研究基于显示路由实现并行路径间流量优化的集中

式流量工程算法,提出了利用遗传算法设计的 ATEPP (Adaptive Traffic Engineering of Parallel Paths) 算法。为了能够及时适应网络流量的大小与分布的变化,提高算法的优化性能,ATEPP 算法设计基于网络拥塞信息和链路利用率,利用网络拥塞信息动态确定网络中需要优化的出入口节点对,利用链路利用率动态判断一对出入口节点对是否需要采用并行路径,同时给出一些可行、简洁的并行路径间流量分配方案简化算法的进化选择。

## 1 并行路径的流量优化模型

网络拓扑用  $G = \{V, E\}$  表示,其中  $V$  和  $E$  分别表示网络中的节点和链路的集合,令  $V = \{v_1, \dots, v_h, \dots, v_L\}$ ,  $E = \{e_1, \dots, e_k, \dots, e_O\}$ , 其中  $v_h (h \in L)$  表示网络中的一个节点,  $e_k (k \in O)$  表示网络中的一条链路。网络的流量矩阵  $Tra = [(s_1, d_1, t_1), \dots, (s_i, d_i, t_i), \dots, (s_N, d_N, t_N)]$ , 其中  $(s_i, d_i, t_i) (i \in N, s_i, d_i \in V)$  中的三个元素分别表示入口节点  $s_i$ 、出口节点  $d_i$  以及第  $i$  个节点对间流量的大小,  $N$  为节点对数目。任一  $(s_i, d_i, t_i)$  对应的路径集为  $p(s_i, d_i) = \{p_{i1}, \dots, p_{ij}, \dots, p_{iM}\}$ , 其中  $p_{ij} (j \in M)$  表示一条从  $s_i$  到  $d_i$  的可行路径;任一路径集  $p(s_i,$

收稿日期:2005-04-20;修订日期:2005-06-08

基金项目:博士点基金资助项目(2003001312);国家自然科学基金资助项目(60372101)

作者简介:曾志民(1956-),男,浙江慈溪人,博士研究生,主要研究方向:宽带网络技术、QoS 与流量工程; 张晨(1980-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向:宽带网络技术、QoS 与流量工程; 冯春燕(1963-),女,山西太原人,副教授,主要研究方向:宽带网络技术、QoS 与流量工程; 丁炜(1935-),男,云南大理人,博士生导师,主要研究方向:宽带网络技术、QoS 与流量工程。

$d_i$ ) 对应的分流比例集为  $\alpha(s_i, d_i) = \{\alpha_{i1}, \dots, \alpha_{ij}, \dots, \alpha_{iM}\}$ 。选择网络成本最小化作为流量优化的目标函数, 并行路径的流量优化目的就在于为任一  $(s_i, d_i, t_i)$  确定一个分流比例集  $\alpha(s_i, d_i)$ , 使全网的成本最低。并行路径的流量优化模型为:

$$\min(NetCost) \quad (1)$$

$$NetCost = \sum_{k=1}^O linkcost(c(e_k), r(e_k)) + \sum_{h=1}^L nodecost(c(v_h), r(v_h)) \quad (2)$$

$$r(e_k) = \sum_{i=1}^N \left( t_i \cdot \sum_{j=1}^M \alpha_{ij} \cdot BE_{ijk} \right) \quad (3)$$

$$r(v_h) = \sum_{i=1}^N \left( t_i \cdot \sum_{j=1}^M \alpha_{ij} \cdot BV_{ijh} \right) \quad (4)$$

$$BE_{ijk} = \begin{cases} 1, & e_k \in P_{ij} \\ 0, & e_k \notin P_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

$$BV_{ijh} = \begin{cases} 1, & v_h \in P_{ij} \\ 0, & v_h \notin P_{ij} \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^M \alpha_{ij} = 1 \quad (7)$$

$$\alpha_{ij} \geq 0 \quad (8)$$

$$r(e_k) \leq u(e_k) \cdot c(e_k) \quad (9)$$

$$r(v_h) \leq u(v_h) \cdot c(v_h) \quad (10)$$

式(1)中  $NetCost$  表示网络成本,  $linkcost(c(e_k), r(e_k))$  和  $nodecost(c(v_h), r(v_h))$  分别代表链路和节点成本, 其中  $c(e_k)$  和  $c(v_h)$  分别表示链路和节点容量,  $r(e_k)$  和  $r(v_h)$  分别表示链路和节点上已占用的资源。网络成本的优化受到链路和节点利用率上限  $u(e_k)$  和  $u(v_h)$  的控制, 如式(9)和式(10)所示。路径集中的所有路径均为可行路径, 本文提出的模型显然满足流量守恒约束。

上述流量优化模型是 NP-C 的, 本文利用遗传算法进行求解。仅利用遗传算法本身的设计技巧难以全面提高算法的性能, 本文提出 ATEPP 算法, 将网络的拥塞信息、链路利用率和流量分配方案引入遗传算法的设计, 以提高算法性能。

## 2 ATEPP 算法

设算法的解空间为  $O$ , 则解空间的大小, 即可行解的数目为  $Vol(O)$ 。设共有  $M$  对出入口节点对, 如果每一对源目的节点对均从可行路径集中选择一条路径, 每对节点分别有  $k_1, \dots, k_i, \dots, k_M$  条可行路径, 则  $Vol(O) = \sum_{i=1}^M k_i$ , 如果某些出入口节点对采用并行路径, 则  $Vol(O)$  将会更为庞大和复杂。根据遗传算法的一般设计规则, 算法的复杂度会随着解空间呈平方律变化<sup>[5]</sup>。

一般而言, 网络需要进行流量优化并不代表网络中所有的出入口节点对的流量都要成为优化对象, ATEPP 根据网络拥塞信息动态确定当前网络中哪些出入口节点对的流量需要优化; 当网络部分链路的负载较重时, 采用并行路径传输流量可取得更佳的优化效果, ATEPP 根据链路利用率动态判定当前哪些出入口节点对需要采用并行路径; 由于并行路径间的

流量分配是 NP-C 问题, ATEPP 给出一些简洁、可行的并行路径间流量分配方案以使算法简化。

### 2.1 优化对象的动态选择

ATEPP 将两类出入口节点对的流量作为优化对象。一类是正在使用并行路径的出入口节点对, 另一类是从当前有流量经过拥塞链路的出入口节点对中依照一定的概率来随机选取。仿真证明根据优化后的解空间设计的算法, 可以达到与在全部解空间中设计的算法不相上下的优化结果。

### 2.2 并行路径的动态选择

为了提高网络优化性能, 当网络中部分链路的负载较重时, 在一些出入口节点对间采用并行路径, 当网络整体负载较重的时候, 应当“鼓励”更多的节点对的流量使用并行路径, 一对节点间是否采用并行路径分网络重载和非重载情况分别判断。

#### 1) 网络重载的判定原则

设网络最大链路利用率为  $MaxU$ , 平均链路利用率为  $MeanU$ , 其门限值为  $U_{max}$  和  $U_{mean}$ , 且  $1 \geq U_{max} > U_{mean} > 0$ , 如果  $MaxU \geq U_{max}$  且  $MeanU \geq U_{mean}$ , 则网络重载, 否则非重载。

#### 2) 采用并行路径的判定原则

设节点对间流量大小与其可行路径集中最大链路容量的比值为  $TR$ , 并设定两个门限值  $HR$  和  $LR$ , 并且  $1 > HR > LR > 0$ , 有:

a) 如果网络重载, 且  $TR \geq LR$ , 则该节点对采用并行路径;

b) 如果网络非重载, 且  $TR \geq HR$ , 则该节点对采用并行路径。

否则, 该节点对不采用并行路径。本文将使用的并行路径的数目设定为 2 条, 由 GA 算法决定选用可行路径集中的哪两条路径。仿真表明每对节点使用两条并行路径足以取得一个令人满意的优化结果。

### 2.3 编码和可行流量分配方案

染色体编码采用自然数编码<sup>[5]</sup>。一条染色体的基因个数为选为优化对象的节点对数目。设有  $N$  个节点对被选中, 一条染色体可以定义为  $Chr = \{g_1, \dots, g_i, \dots, g_N\}$ 。在一条染色体中, 可能一部分基因对应的出入口节点对的流量采用单路径, 而另一部分采用并行路径, 因此定义一个布尔向量  $IS = [is_1, \dots, is_i, \dots, is_N]$  来区分。如果  $is_i = 0$  ( $is_i \in IS$ ),  $g_i$  对应的出入口节点对的流量采用单路径, 否则采用并行路径。

定义可行流量分配方案的集为  $FF = \{ff_1, \dots, ff_i, \dots, ff_P\}$ 。设一对出入口节点对的流量采用的 2 条并行路径的流量分配比例为  $a$  和  $b$ , 可行的流量分配比例为  $FR = [1.0, 0.95, 0.8, 0.5, 0.2, 0.05, 0]$ , 则  $a$  和  $b$  应当满足:  $a, b \in FP$ , 且  $a + b = 1$ 。当一对出入口节点对的流量有  $M$  条可行路径时, 其可行流量分配方案集  $FF$  的大小为  $Vol(FF) = \frac{5}{2} \cdot C_M^2 + C_M^1$ 。将  $M$  的值设定在 6 以下是一个切实、可行的选择。

### 2.4 适应度函数、选择、交配与突变

ATEPP 算法选取网络成本的负数作为适应度函数,

Normalized Geometric Ranking 作为选择方法。为了提高种群的多样性,被选中进行交配或突变的染色体中的每一个基因可根据某一概率独立决定是否进行交配或突变<sup>[5]</sup>。

### 3 仿真分析

利用 Waxman 模型生成的各种随机拓扑和英国的 UKNet 对 ATEPP 进行仿真,并与 Cisco 的 InCapSPF, GA-1, GA-2, 和 IDEAL 相比较。GA-1 和 GA-2 为没有进行解空间简化的算法,GA-1 中所有的出入口节点对的流量只选择一条路径,GA-2 中所有的出入口节点对的流量都选择两条路径。IDEAL 为并行路径流量优化模型的理论最优解。文中仅给出采用 UKNet 网络的仿真结果,仿真用计算机主频为 2.4GHz。

图 1 为随着网络流量的增加 ATEPP、GA-1 和 GA-2 三种算法的运行时间比较,ATEPP 的运行时间明显的比 GA-2 短,当没有出入口节点对的流量被选中,ATEPP 的运行时间就是 0。IDEAL 的运行时间在每轮优化中都至少是 10min 以上,所以图中没有给出。

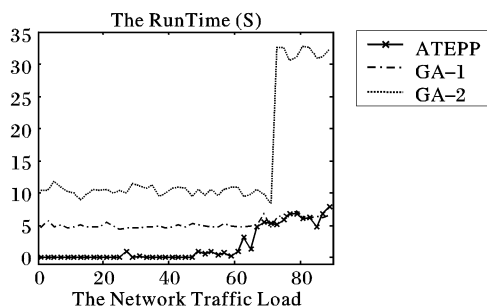


图 1 运行时间

图 2 给出了网络重载时三种算法的收敛速度比较,可以看出即使网络处于重载状态,ATEPP 算法的收敛速度仍然是最快的,为 GA-2 的两倍以上。而 GA-1 的稳定解是最差的。

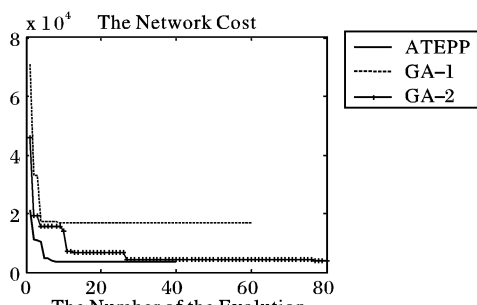


图 2 收敛速度

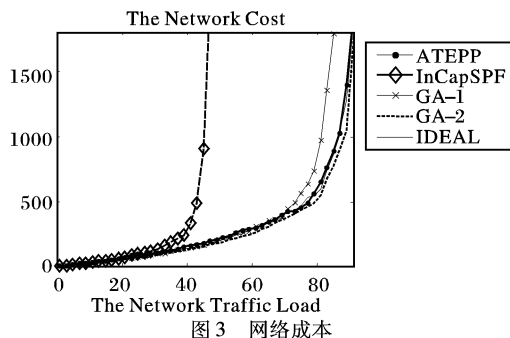


图 3 网络成本

图 3、图 4 和图 5 为随着网络流量的增加, ATEPP、InCapSPF、GA-1、GA-2 和 IDEAL 的网络成本、平均和最大链

路利用率的变化。可以看出 ATEPP 同时优化了网络的成本与链路利用率,它明显优于 InCapSPF;且当网络处于重载状态,与 GA-1 相比 ATEPP 和 GA-2 的网络成本优化结果与 IDEAL 非常接近。ATEPP 与 GA-2 的优化结果是不相上下的。

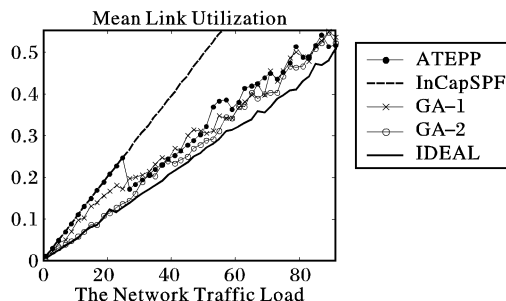


图 4 平均链路利用率

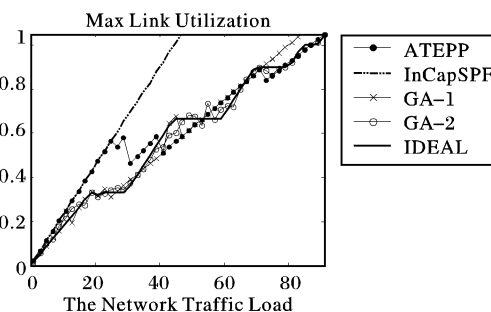


图 5 最大链路利用率

设链路的数目为  $E$ , 一条路径跳数的上限为  $J$ , 染色体的长度为  $N$ , 则适应度函数的复杂度为  $O(NJ + 2E)$ 。而调用适应度函数的次数是由进化的代数数和染色体进行交配和突变的次数决定的, 在 ATEPP 中它们的值是正比于  $N$ 。因此 ATEPP 的算法复杂度为  $O(N^3J + 2N^2E)$ 。

### 4 结语

本文对动态并行路径的集中式流量工程进行研究, 提出了 ATEPP 算法。该算法将网络的拥塞信息与链路利用率引入遗传算法, 实现了动态的判定优化对象, 动态的确定是否采用并行路径, 并且通过给出可行、简洁的流量分配方案简化流量分配的选择。通过仿真分析表明 ATEPP 能够以较快的收敛速度, 取得比较理想的网络优化效果。

#### 参考文献:

- [1] AWDUCHE DO, CHIU A, ELALID A. RFC 3272, Overview and principles of internet traffic engineering[S], 2002.
- [2] FORTZ B, THORUP M. Internet traffic engineering by optimizing ospf weights[A]. INFOCOM 2000[C]. TelAviv, Israel, 2000, (3): 519-528.
- [3] MULYANA E, KILLAT U. An alternative genetic algorithm to optimize ospf weights[A]. 15-th ITC Specialist Seminar[C]. Germany, 2002, (7): 186-192.
- [4] LIU H, BAI D, DING W. An explicit routing optimization algorithm for internet traffic engineering[A]. ICCT 2003[C]. Beijing, China, 2003, 1(4): 186-192.
- [5] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.